

Klanganalyse der Glocken der Neustädter Marienkirche in Bielefeld



Friedrich Balck

Institut für Physik und Physikalische Technologien,
TU Clausthal

Am 1.12.2003 durfte ich die vier etwa zehn Jahre alten Bronzeglocken in der Marienkirche besichtigen, einige Klöppelschläge mit Hand ausgeführt und dabei die Töne mit einem Mikrofon aufzeichnen. Das Ergebnis der anschließenden Klanganalyse möchte ich hier vorstellen. Doch zuvor einige Bemerkungen zum Klang von Glocken.

Physik und Musik der Glocken

Im Gegensatz zu Klangerzeugern, deren Tonhöhe (Frequenz = Anzahl der Schwingungen pro Sekunde) hauptsächlich durch die geometrische Ausdehnung des Resonanzkörpers in nur einer einzigen Richtung bestimmt wird, wie beispielsweise bei der Blockflöte, der schwingenden Saite oder bei der Trompete, handelt es sich bei Glocken um dreidimensionale Klangerzeuger. Hier sind verschiedene Bereiche nach dem Anschlag aktiv, so daß sich mehrere Schwingungen mit unterschiedlichen Tonhöhen auf der Mantelfläche stabil halten können.

Bei den oben genannten Musikinstrumenten bestimmt deren Länge die Tonhöhe. In der Regel handelt sich hierbei aber nicht nur um eine Frequenz, sondern um ein Gemisch von vielen Frequenzen. Neben dem Grundton gibt es die sogenannten Obertöne, die zur Grundfrequenz jeweils in einem „harmonischen“ Verhältnis wie 1:2, 1:3, 1:4 1:n stehen und durch ihre relative Lautstärke zueinander für den charakteristischen Klang des Instrumentes sorgen. Wie bei einem Kuchen das Rezept, Anzahl und Menge der Zutaten, den Geschmack bestimmt, so definiert die Verteilung der Obertöne das Klangbild eines Instrumentes.

Bei dreidimensionalen Gebilden wie den Glocken ist die Sache weitaus komplizierter. Die Schwingungsfrequenzen einer Glocke sind vergleichbar mit dem Zusammenspiel mehrerer unabhängiger Instrumente. Jedes Instrument hat für sich seine eigene Grundfrequenz mit Obertönen und individueller Lautstärke. Der Gesamtklang hängt daher von der Stimmung und Lautstärke jedes Instrumentes ab. Bei Glocken nennt man die unterschiedlichen Schwingungen Teiltöne oder Partialtöne. Ein wohlklingendes Blockflötenquartett kann einen Gesamtklang erzeugen, der sich wie ein einzelner Ton anhört und den man ohne Zweifel sofort nachsingen kann. Bei schlechter Stimmung oder unausgewogener Lautstärke hört man mehrere Töne gleichzeitig. Wenn die Teiltöne im Laufe der Zeit unterschiedlich ausklingen, verändert sich das Klangbild.

Bei „wohlklingenden“ Glocken sollte beim Anschlagen in unseren Ohren ein Klang entstehen, der sich eindeutig nachsingen läßt. Dies ist der Fall, wenn die unterschiedlichen Teiltöne der Glocke so aufeinander abgestimmt sind, daß sie harmonisch klingen. Darüberhinaus sollte der Anschlag einem Ton auf unserer gewohnten Tonskala mit ihren Halbtonschritten zuzuordnen sein, wenn man mehrere Glocken in einem Geläut erklingen lassen möchte. Der sogenannte Schlagton, mit dem Glocken in der Regel angegeben werden, ist nicht physikalisch meßbar, sondern entsteht als subjektiver Eindruck beim Zuhörer aus dem Gemisch der Teiltöne.



Bei einer musikalisch sauberen Anordnung der Teiltöne entspricht der Schlagton der weiter unten definierten *prime*.

Strawinski hat in seinem *Pater Noster* im ersten Akkord die wichtigsten Teiltöne einer „guten“ Glocke angegeben. Dies sind von unten nach oben: Grundton, Oktave, (Moll)Terz, 2. Oktave. Weiterhin sollten noch dazugehören: die Quinte oberhalb der Terz und die Quinte oberhalb der 2. Oktave.

Im englischen Sprachgebrauch heißen diese Töne mit den zugehörigen Frequenzen:

hum	0.5	* prime
prime	1.0	
terce	1.2	* prime
quint	1.5	* prime
nominal	2.0	* prime
superquint	3.0	* prime
oct. nominal	4.0	* prime

(Quelle: Bill Hibberts, Great Bookham, Surrey UK, www.hibberts.co.uk, Simpson-Regel ¹ von 1895)

Bei einem Blockflötenquintett mit Sopranino-, Sopran-, Alt-, Tenor- und Baßblockflöte gilt für die Frequenzen bei gleichem Fingersatz:

Baß	1.0	
Tenor	1.5	* Baß
Alt	2.0	* Baß
Sopran	3.0	* Baß
Sopranino	4.0	* Baß

Bis auf *hum* und *terce* haben die Blockflöten die gleichen Frequenzverhältnisse wie die Teiltöne einer „guten“ Glocke.

Was die Lautstärke betrifft, geht bei einer Glocke - im Bild der Blockflötenspieler - den höchsten Tönen nach dem Anschlag sehr schnell die Puste aus, während der tiefste Ton erst etwas später seine richtige Lautstärke entwickelt und bis zu einigen Viertelminuten anhalten kann.

Ob die Glocke gut klingt, d.h. wie das Verhältnis der Teiltöne bezüglich deren Frequenz und anteiliger Lautstärke ist, hängt von der geometrischen Form der Glocke ab. Jeder Glockengießer bemüht sich, seinem (auch unserem) Ideal möglichst nahe zu kommen. So haben sich im Laufe von vielen Jahrhunderten Bauformen herausgebildet, die wir als klanglich gut erkennen, und die sich auch mit mehreren anderen Glocken in einem Geläute „vertragen“.

Doch wie die neu gegossenen Glocken für die Dresdener Frauenkirche zeigen, bei denen sechs der sieben nach dem ersten Guß noch einmal eingeschmolzen wurden, weil sie nicht den Idealen entsprachen, ist jede gegossene Glocke ein Individuum, dessen Eigenschaften sich nicht hundertprozentig vorhersagen lassen.

¹ A. B. Simpson, On Bell Tones, Pall Mall Magazine Vol. VII, p. 183-194, 1895 und Vol. VIII, p. 150-155, 1896

Analyseverfahren gestern und heute

Während man früher die Klanganalyse einer Glocke mit Sätzen von Stimmgabeln vornahm, deren Frequenzen man mit verschiebbaren Zusatzmassen einstellen konnte, bietet heute der Computer mit seiner Musikkfähigkeit eine direkte Frequenzanalyse. Mit den Stimmgabeln versucht man durch Probieren mit der richtigen Einstellung der Zusatzmassen die einzelnen Teiltöne der Glocke anzuregen, d.h. ihr eine Tonhöhe anzubieten, die sie „mag“, mit der sie sich in Schwingung versetzen läßt. Dieses Verfahren erfordert ein gutes Gehör und viel Zeit für das Probieren.

Heute genügt ein Glockenschlag, den man per Mikrophon in den Rechner überträgt. Mit Hilfe von mathematischen Verfahren lassen sich Frequenzen und Lautstärken aller Teiltöne problemlos bestimmen (z.B. das Programm von Bill Hibberts).

Zur Charakterisierung von Tonhöhen nennt der Physiker die Frequenz (z.B. 440 Hz), während der Musiker den Tonnamen (z.B. A₄ oder a') und seine Abweichung

von einer genormten Stimmung angibt. (z.B. +4/16 Halbton oder +25 Cent). In der nachfolgenden Tabelle sind neben dem Bild einer Klaviertastatur Frequenzen, Tonnamen und Tonabstände in Cent aufgelistet. Ein Halbtonschritt entspricht 100 Cent, 12 Halbtöne (eine Oktave) sind 1200 Cent. Im englischen Sprachgebrauch reichen die Tonnamen für den Tonumfang eines Klaviers von C(0) bis C(9) oder von C(-3) bis C(6) und im deutschen von C“ bis c””” (sechsfach gestrichenes c). Was wir mit Cis und Des bezeichnen, heißt dort C# oder Db. Ein H bei uns ist dort ein B und ein B ein Bb.

Empfindliche Ohren können noch wenige Cent unterscheiden, während manche Menschen kaum Unterschiede zwischen Halbtönen erkennen. Für das Miteinander von Teiltönen einer Glocke oder das Nebeneinander von mehreren Glocken im Geläut sind Abweichungen von 1/4 Halbtönen = 4/16 oder 25 Cent durchaus tolerierbar, während im Orchester derartige Verstimmungen schon stören können.

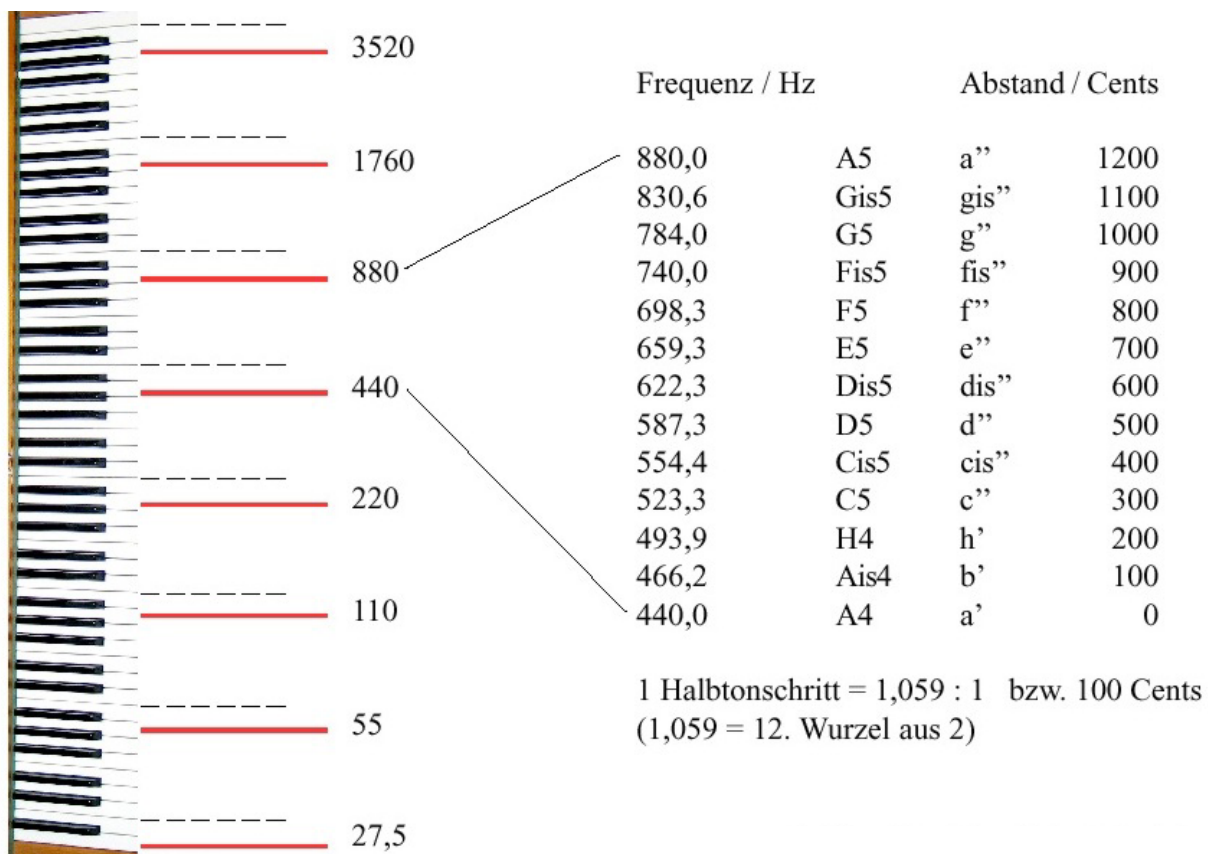


Abb. 2: Zuordnung von Klaviertasten, Tönen, Namen und Frequenzen

Meßergebnisse

Die vier Glocken haben folgende Teiltöne:

(Bei einigen Glocken gibt es darüberhinaus noch weitere, vergleichsweise laute Teiltöne, siehe Tabelle 2 und Abb. 4a-4d.)

Glocke 1, nominal: 465 Hz, ais / Bb

Christusglocke, 1704 mm, 3242 kg

Name	Tonname	Abweichung zu 440 Hz	Abweichung zu <i>prime</i> (in 1/16 Halbton)
hum	Bb(-1)	-2	-1
prime	Bb(0)	-4	-3
terce	Db(1)	-1	0
quint	F(1)	0	-1
nominal	Bb(1)	-1	0
superquint	F(2)	-1	0
oct. nominal	Bb(2)	8	9

hum	Bb(-1)	-2	-1
prime	Bb(0)	-4	-3
terce	Db(1)	-1	0
quint	F(1)	0	-1
nominal	Bb(1)	-1	0
superquint	F(2)	-1	0
oct. nominal	Bb(2)	8	9

Glocke 2, nominal: 525,5 Hz, c

Marienkirchenglocke, 1505 mm, 2172 kg

hum	C(0)	1	0
prime	C(1)	2	1
terce	Eb(1)	2	1
quint	G(1)	5	4
nominal	C(2)	1	0
superquint	G(2)	0	-1
oct. nominal	C(3)	9	8

Glocke 3, nominal: 550,5 Hz, cis / Db

Gebetsglocke, 1452 mm, 1856 kg

hum	Db(0)	-3	-1
prime	Db(1)	-4	-2
terce	E(1)	-2	0
quint	Ab(1)	2	4
nominal	Db(2)	-2	0
superquint	Ab(2)	-2	0
oct. nominal	Db(3)	6	8

Glocke 4, nominal: 626,5 Hz, dis / Eb

Sakramentsglocke, 1305 mm, 1404 kg

hum	Eb(0)	0	-2
prime	Eb(1)	-5	-7
terce	F#(1)	1	-1
quint	Bb(1)	4	2
nominal	Eb(2)	2	0
superquint	Bb(2)	1	-1
oct. nominal	Eb(3)	9	7

Tabelle 1: Die Teiltöne der Glocken nach der Regel von Simpson, 1895

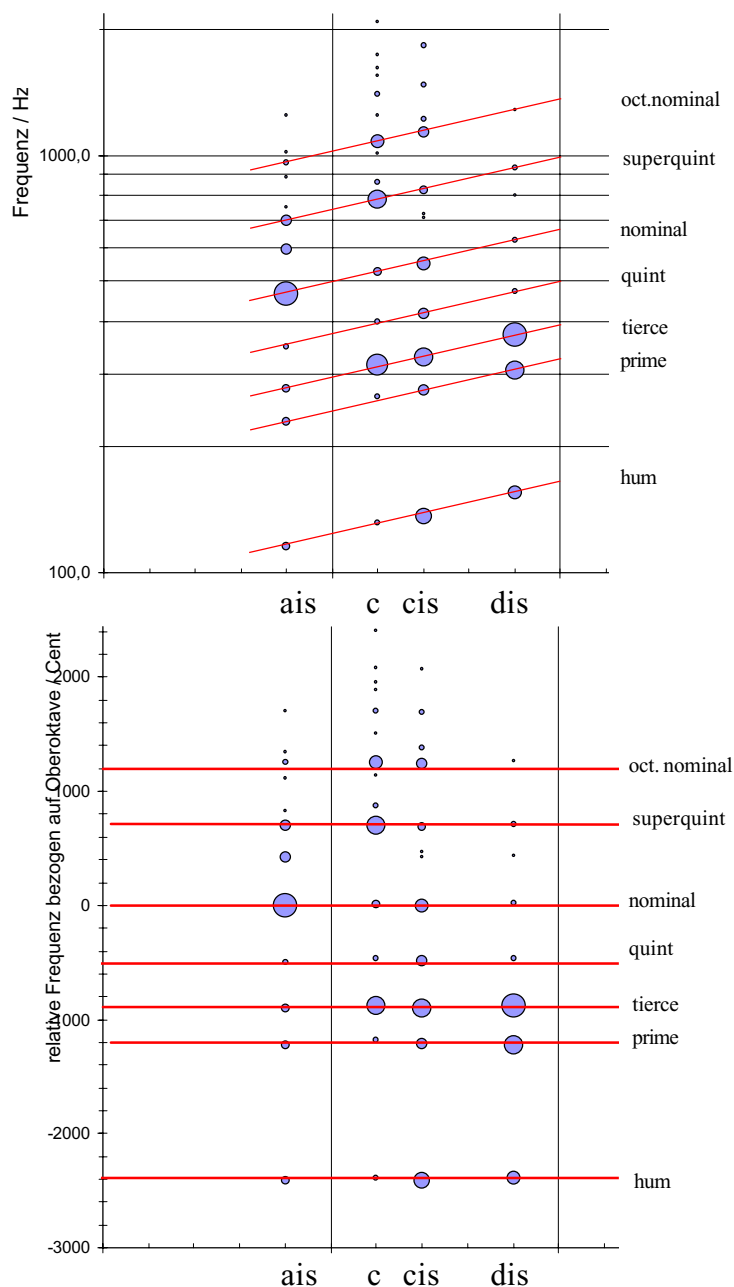


Abb. 3a: Frequenzen der Teiltöne für die vier Glocken. Die parallelen schrägen Linien ermöglichen eine Beurteilung der Stimmung der Teiltöne untereinander. Der Durchmesser der Kreise ist ein Maß für die Signalamplitude (Lautstärke) der Teiltöne.

Abb. 3b: Stimmung der Töne untereinander, die Frequenzen sind so normiert, daß alle *nominal* - Töne den gleichen Wert bekommen, Darstellung in Cent (1 Halbton= 100 Cent). Der Durchmesser der Kreise ist ein Maß für die Signalamplitude (Lautstärke) der Teiltöne.

<i>hum</i> :	-2400 Cent	= 2 Oktaven unter <i>nominal</i>
<i>prime</i> :	-1200 Cent	= 1 Oktave unter <i>nominal</i>
<i>terce</i> :	-900 Cent	= 1 Terz über <i>prime</i>
<i>quint</i> :	-500 Cent	= 1 Quinte über <i>prime</i>
<i>nominal</i> :	0 Cent	
<i>superquint</i> :	700 Cent	= 1 Quinte über <i>nominal</i>
<i>oct. nominal</i> :	1200 Cent	= 1 Oktave über <i>nominal</i>

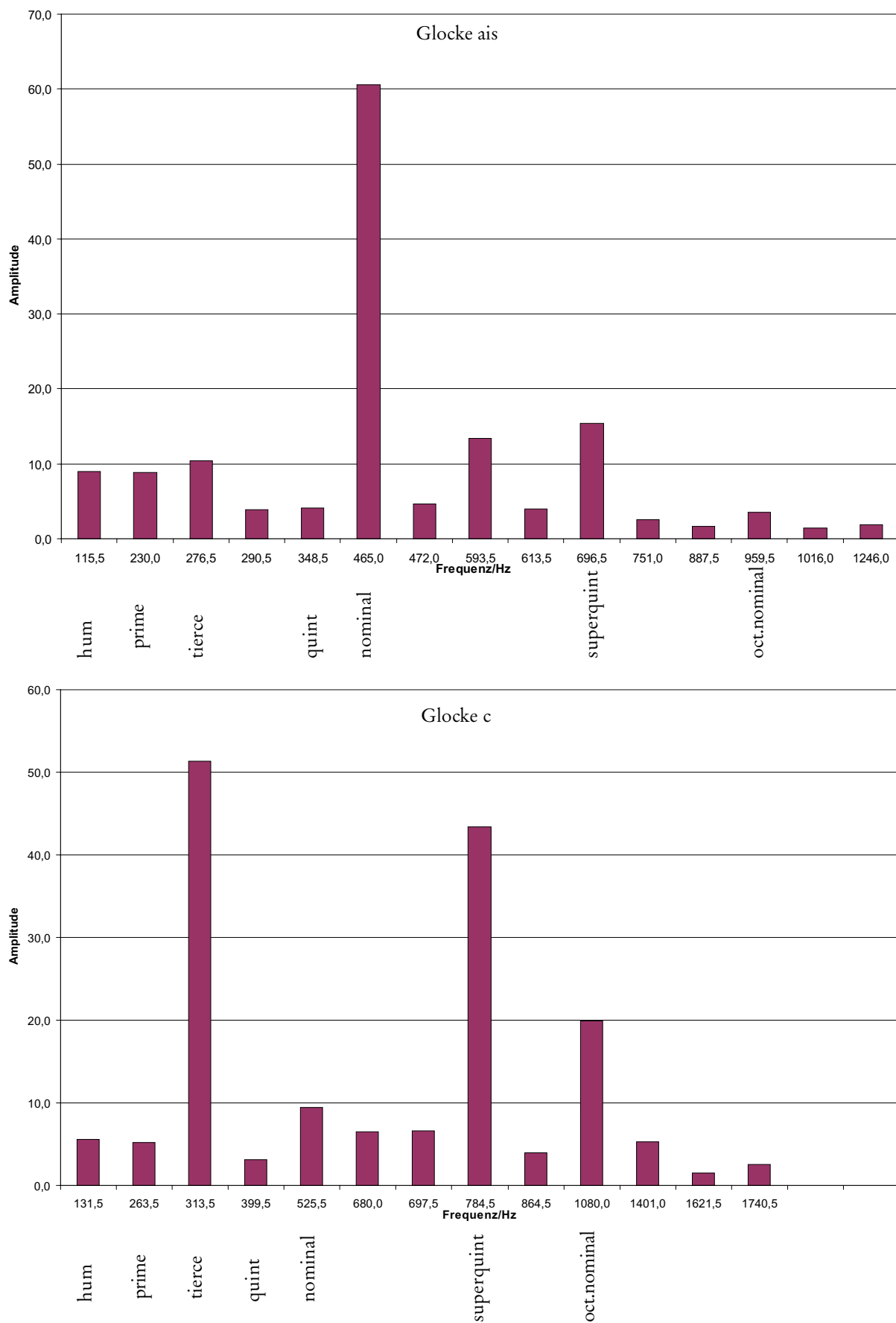
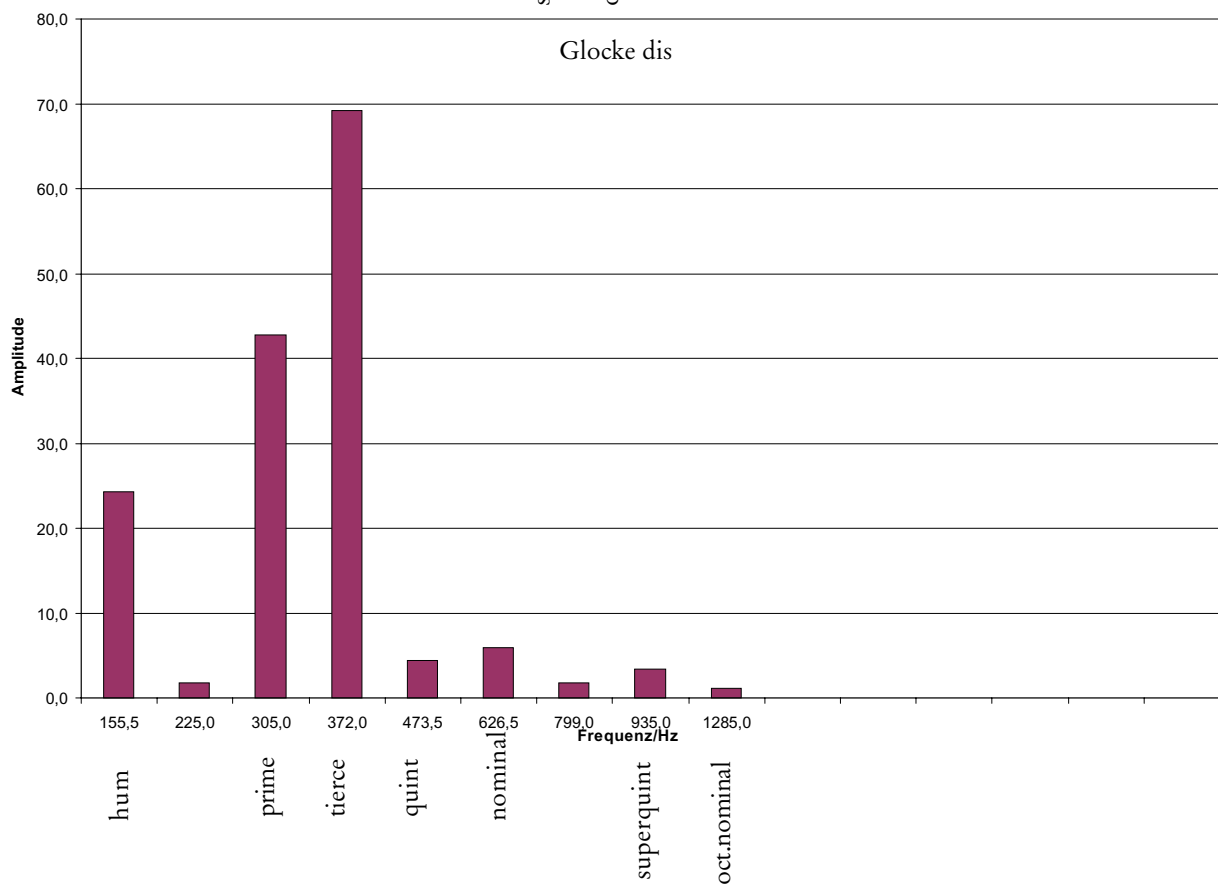
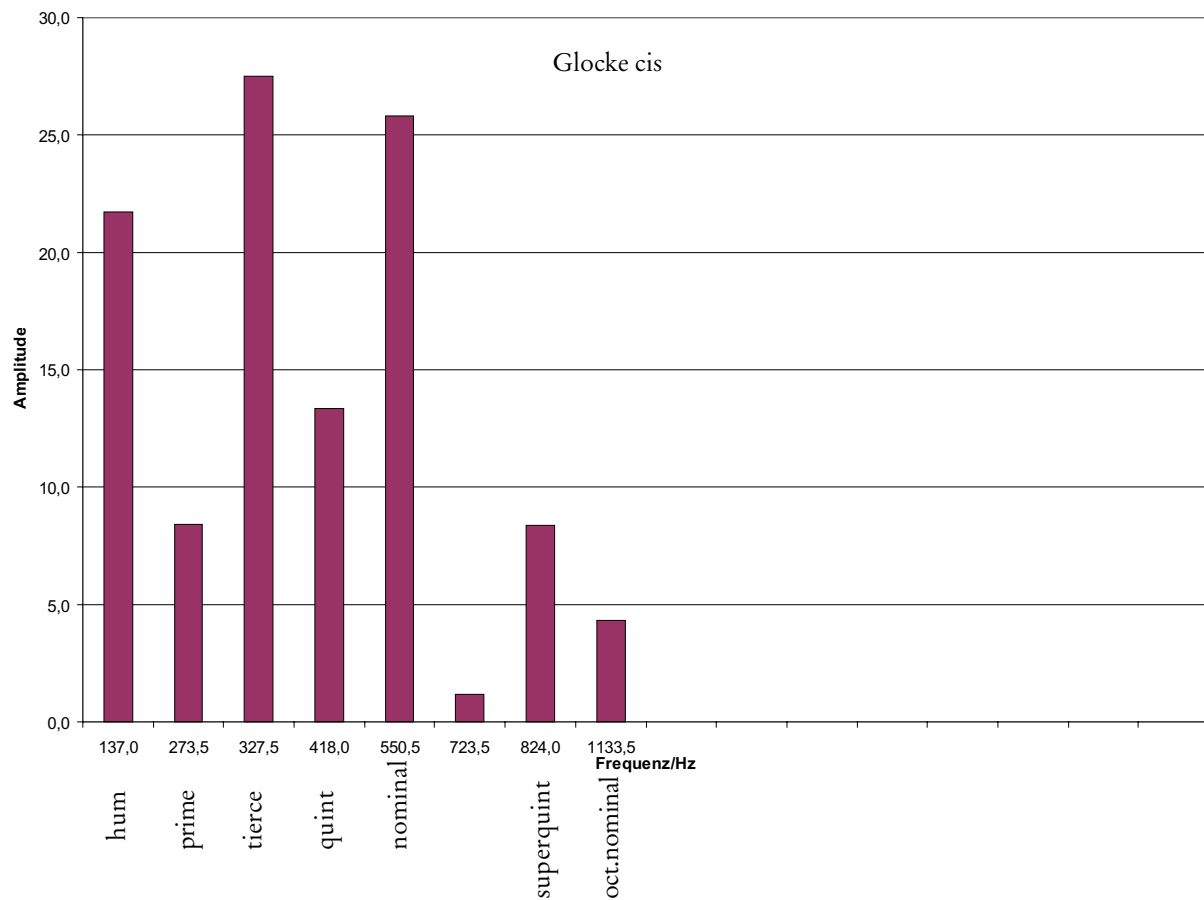


Abb. 4a bis 4d (nächste Seite): Signalamplitude (Lautstärke) der einzelnen Teiltöne und zugehörige Frequenzen für die vier Glocken, gemittelt über die erste Sekunde des Klangs.



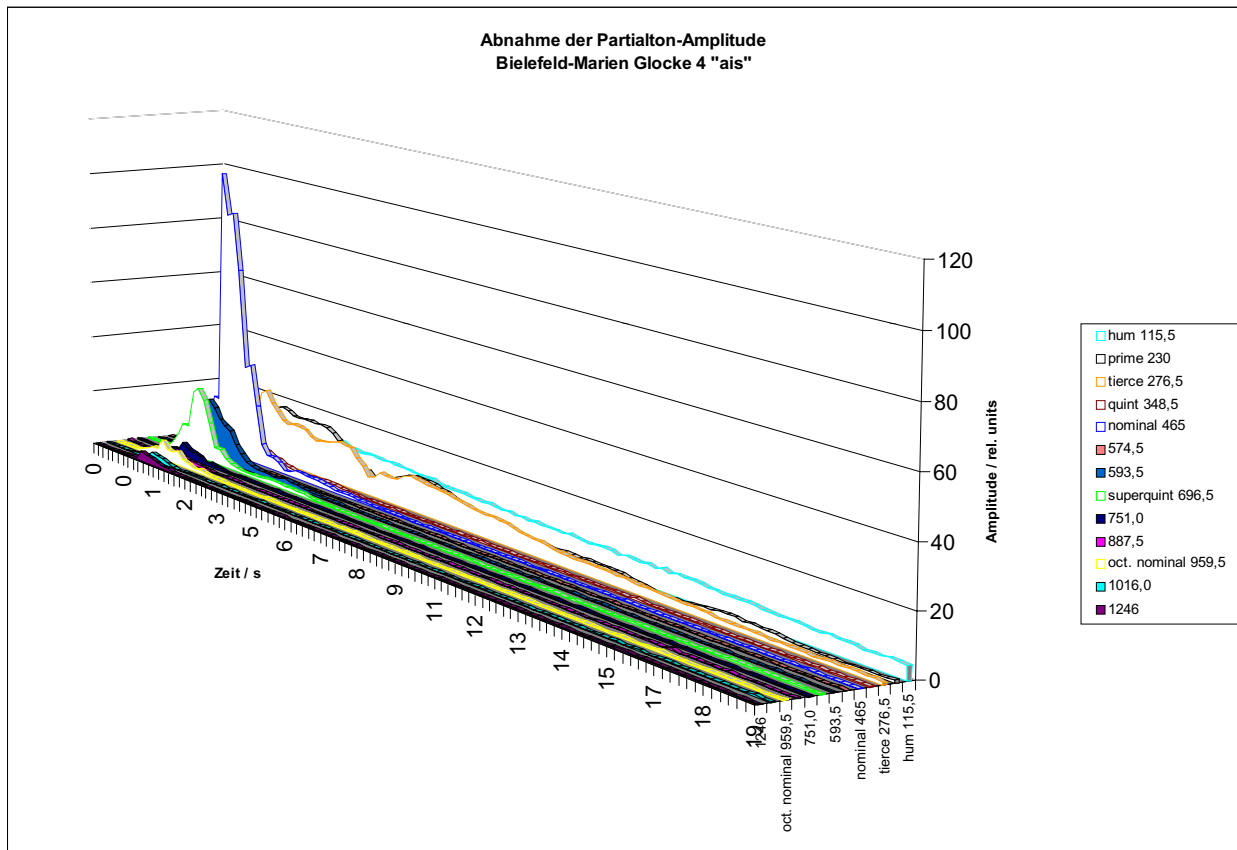
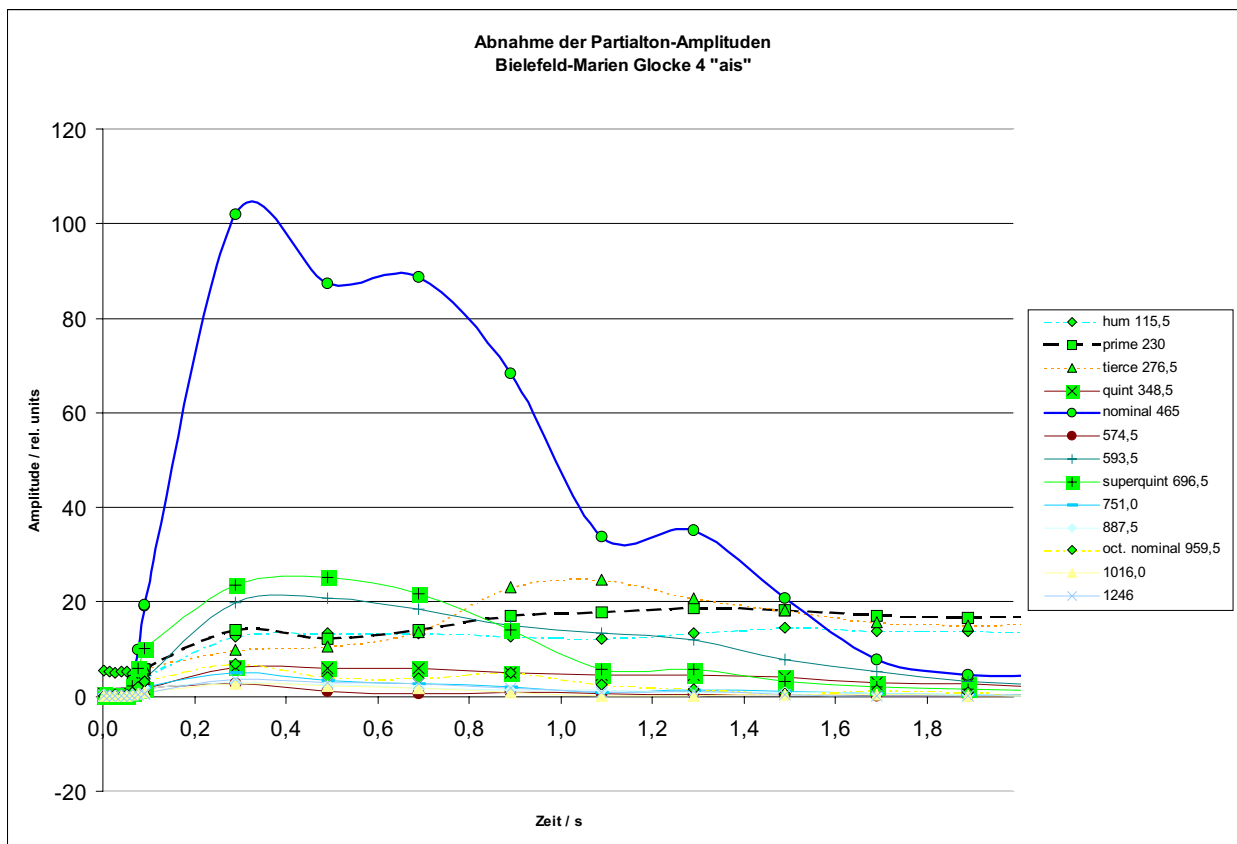


Abb. 5a und 5b: Zeitlicher Verlauf der Signalamplituden der Teiltöne der Glocke ais



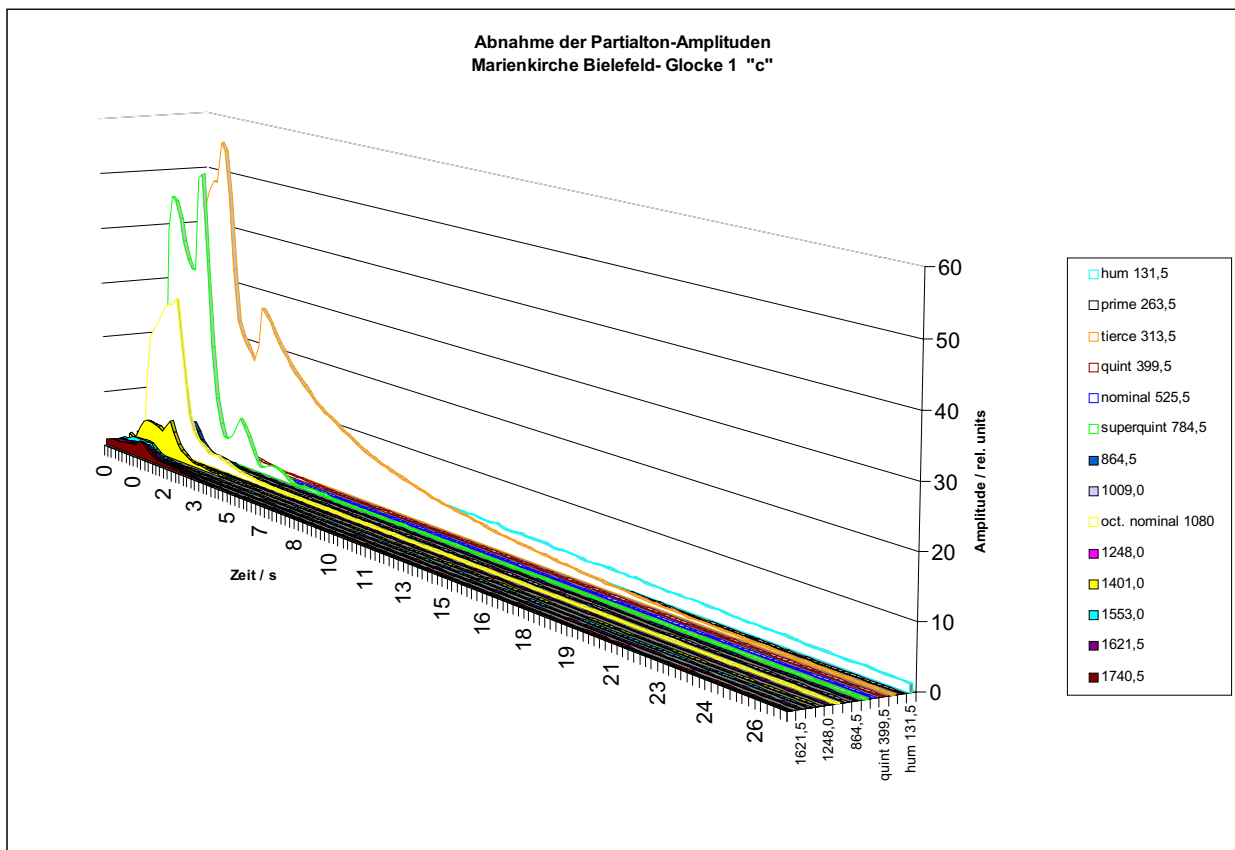
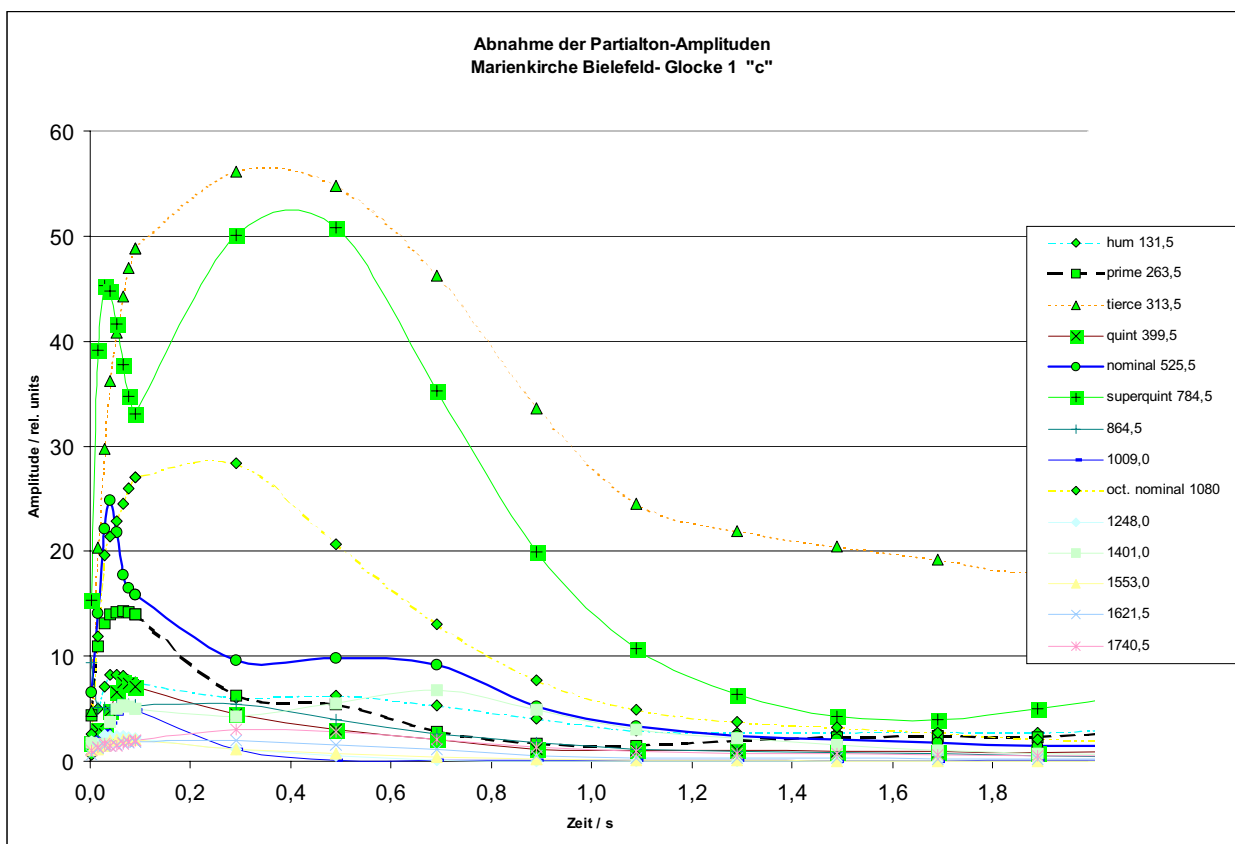


Abb. 6a und 6b: Zeitlicher Verlauf der Signalamplituden der Teiltöne der Glocke c



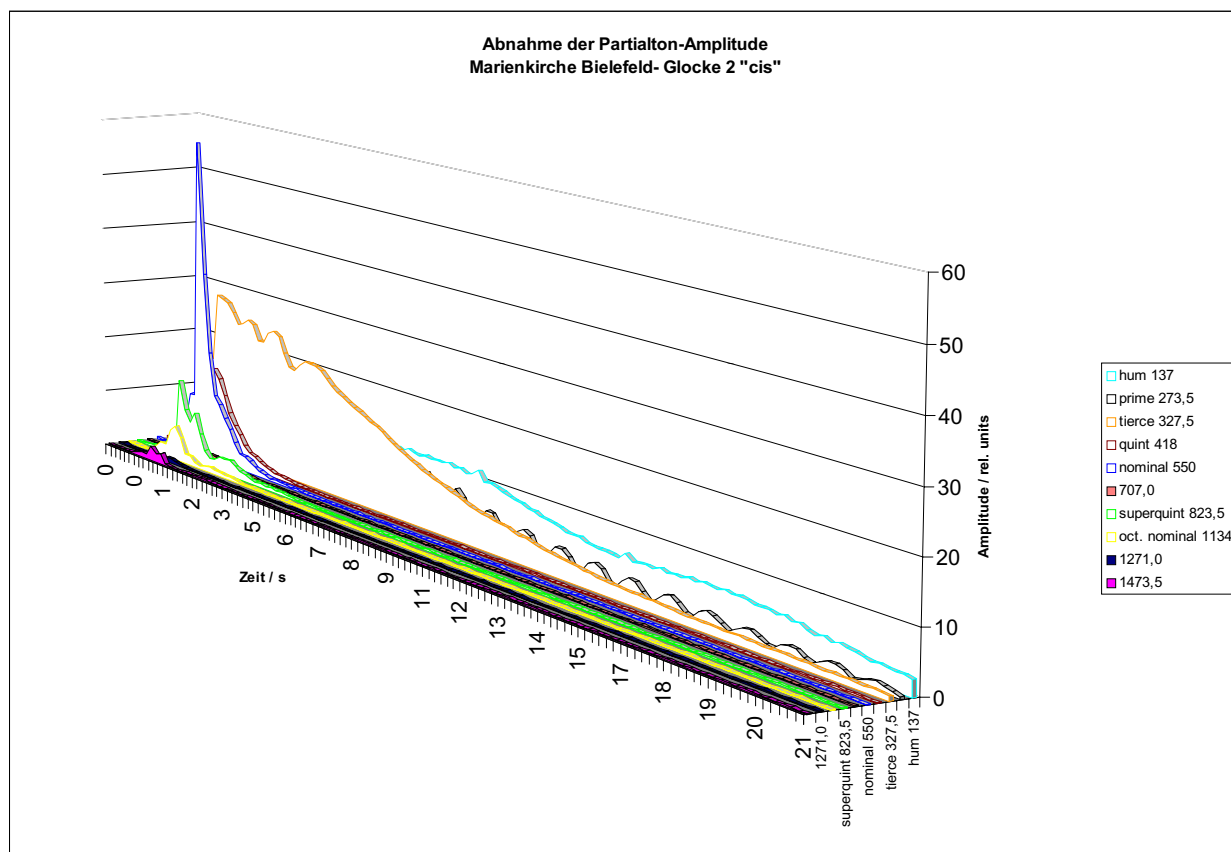
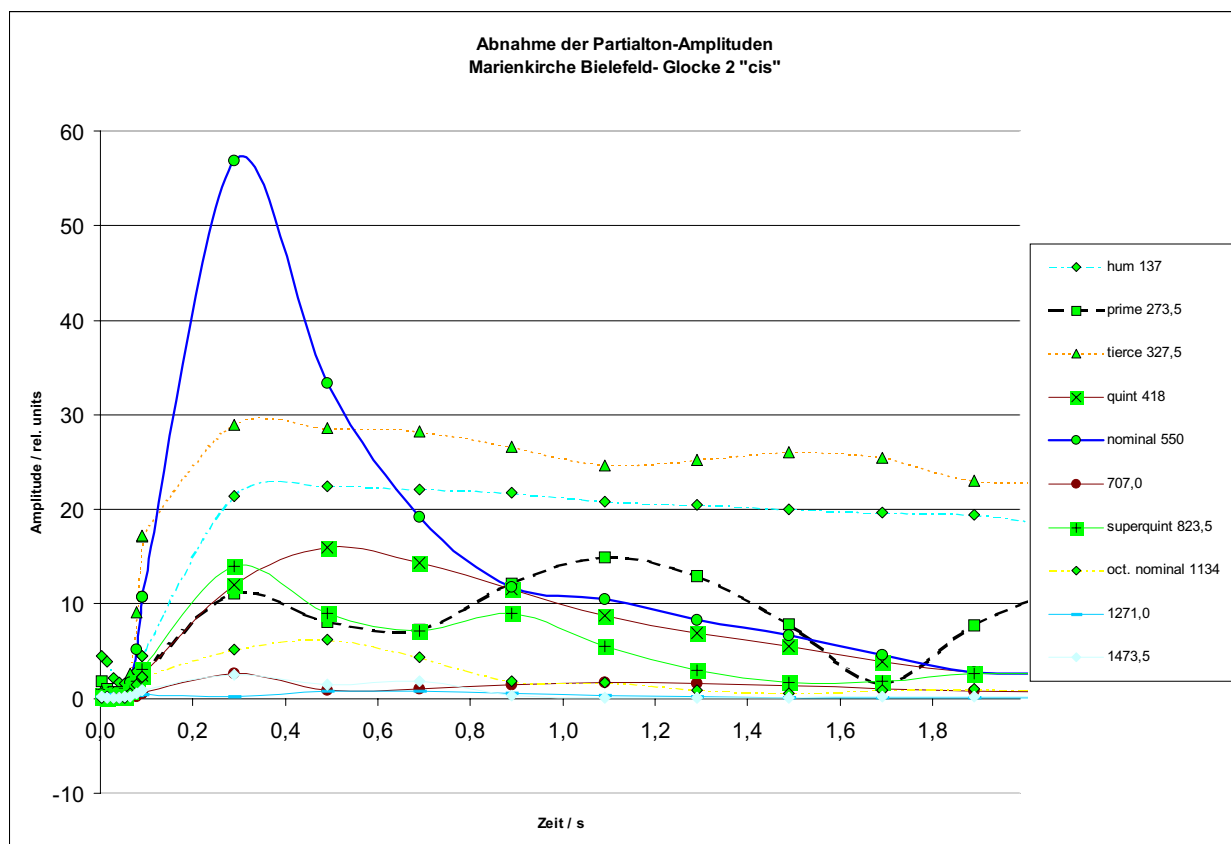


Abb. 7a und 7b: Zeitlicher Verlauf der Signalamplituden der Teiltöne der Glocke cis



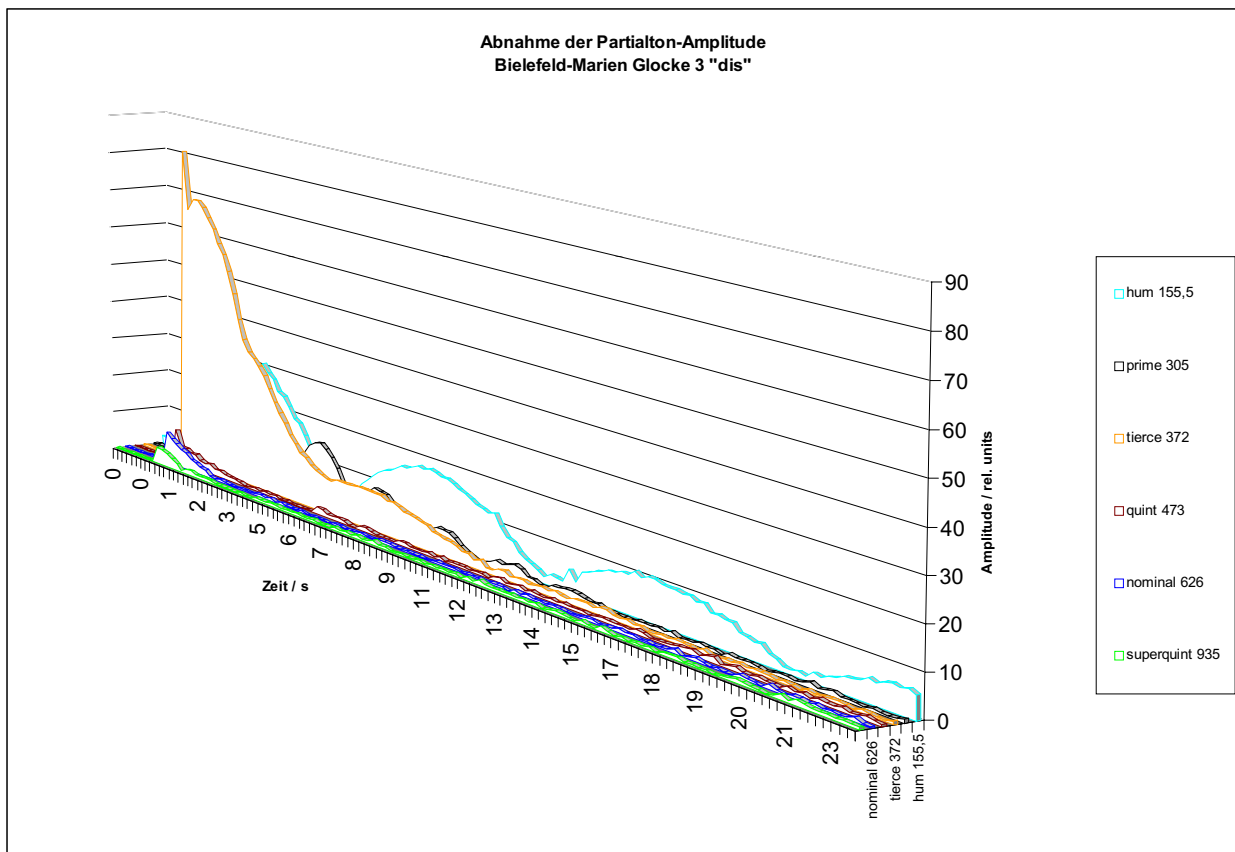
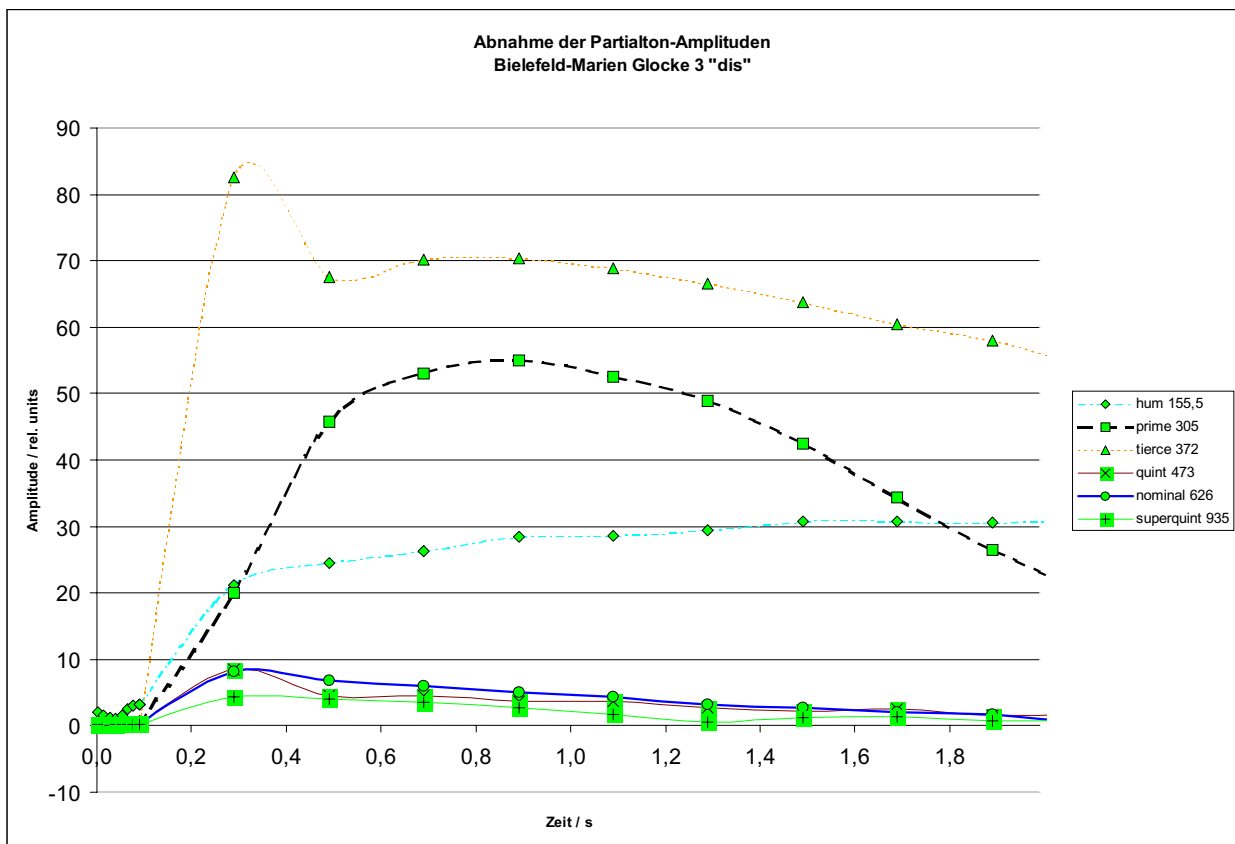


Abb. 8a und 8b: Zeitlicher Verlauf der Signalamplituden der Teiltöne der Glocke dis



Glocke 1, nominal: 465,0 Hz, Ton ais(1) = Bb(1) -1/16

1	2	3	4	5	6	7
115,5	8,9	-2411	hum	Bb(-1) -15	-15	-2
230,0	8,8	-1219	prime	Bb(0) -23	-23	-4
276,5	10,4	-900	terce	Db(1) -4	-4	-1
290,5	3,9	-814		D(1) -18	-18	-3
348,5	4,1	-499	quint	F(1) -3	-3	0
465,0	60,6	0	nominal	Bb(1) -4	-4	-1
472,0	4,6	26		Bb(1) +21	21	3
593,5	13,4	422		D(2) +18	18	3
613,5	4,0	480		Eb(2) -24	-24	-4
696,5	15,3	699	superquint	F(2) -4	-4	-1
751,0	2,5	830		F#(2) +25	25	4
887,5	1,6	1119		A(2) +14	14	2
959,5	3,5	1254	oct. nom.	Bb(2) +49	49	8
1016,0	1,5	1353		B(2) +48	48	8
1246,0	1,9	1706		Eb(3) +2	2	0

Glocke 2, nominal 525,5 Hz, Ton c(2) + 1/16

131,5	5,6	-2398	hum	C(0) +9	9	1
263,5	5,2	-1195	prime	C(1) +12	12	2
313,5	51,3	-894	terce	Eb(1) +13	13	2
399,5	3,1	-475	quint	G(1) +32	32	5
525,5	9,4	0	nominal	C(2) +7	7	1
680,0	6,5	446		F(2) -46	-46	-7
697,5	6,6	490		F(2) -2	-2	0
784,5	43,4	694	superquint	G(2) +1	1	0
864,5	4,0	862		A(2) -30	-30	-5
1080,0	19,9	1247	oct. nom.	C(3) +45	55	9
1401,0	5,2	1698		F(3) +5	5	1
1621,5	1,5	1951		Ab(3) -41	-41	-7
1740,5	2,5	2073		A(3) -19	-19	-3

Glocke 3, nominal: 550,5 Hz, Ton cis(2) = Db(2) -2/16

137,0	21,7	-2408	hum	Db(0) -19	-19	-3
273,5	8,4	-1211	prime	Db(1) -23	-23	-4
327,5	27,5	-899	terce	E(1) -11	-11	-2
418,0	13,4	-477	quint	Ab(1) +11	11	2
550,5	25,8	0	nominal	Db(2) -12	-12	-2
723,5	1,2	473		F#(2) -39	-39	-6
824,0	8,4	698	superquint	Ab(2) -13	-13	-2
1133,5	4,3	1250	oct. nom.	Db(3) +38	38	6

Glocke 4, nominal: 626,5 Hz, Ton dis(2) = Eb(2) + 2/16

155,5	24,3	-2412	hum	Eb(0) +0	0	0
225,0	1,8	-1773		A(0) +38	38	6
305,0	42,8	-1246	prime	Eb(1) -34	-34	-5
372,0	69,2	-902	terce	F#(1) +9	9	1
473,5	4,4	-485	quint	Bb(1) +27	27	4
626,5	5,9	0	nominal	Eb(2) +11	11	2
799,0	1,7	421		G(2) +32	32	5
935,0	3,4	693	superquint	Bb(2) +4	4	1
1285,0	1,2	1244	oct. nom.	Eb(3) +56	56	9

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

Tabelle 2: Analyse der Glockentöne

1)Frequenz, 2) Signalamplitude, 3)Abweichung in Cent bezogen auf *nominal* dieser Glocke

4)Teilton-Name nach Simpson, 5)Tonname,

6 Abweichung bezogen auf die Stimmung mit 440 Hz in Cent, 7)in 1/16 Halbton

Auswertung

Das Klangbild der 1993 von der Glockengießerei H.A. Mark in Brockscheid gegossenen Bronzeglocken wurde mit computergestützten Methoden analysiert. Bei allen Glocken lassen sich die von Simpson 1895-96 beschriebenen Teiltöne nachweisen, darüberhinaus gibt es noch weitere Töne, besonders bei den tiefen Glocken (Tabelle 2).

Die Stimmung der Teiltöne untereinander bewegt sich im Bereich von einigen 16-tel Halbtönen. Auffällig ist bei allen Glocken, daß der Ton *oct. nominal* bei allen etwa um einen Viertelton oberhalb der Oktave liegt.

Die Glocke „c“ ist etwas zu hoch gegenüber ihren beiden Tonnachbarn.

Zu beachten ist die Verteilung der Lautstärken (Abb. 4a-d) innerhalb der Teiltöne. Obwohl einige Glocken sehr starke Terzen (Glocke „c“ und „cis“) oder eine laute Superquinte (Glocke „c“) haben, findet das menschliche Ohr durchaus den gewünschten Schlagton heraus.

Wie sich die Lautstärken der Teiltöne vom Zeitpunkt des Anschlages ändern, ist in den Abb. 5 bis 8 für die vier Glocken dargestellt. Besonders in den unteren Diagrammen erkennt man, daß bei den Glocken „ais“ und „cis“ *nominal* vorherrscht (Abb. 5b und 7b), während bei der Glocke „dis“ *terce* und *prime* sehr kräftig sind (Abb. 8b). Für die Glocke „c“ gilt, daß *terce* und *superquint* sehr stark sind, während *prime* und *nominal* vergleichsweise schwach bleiben (Abb. 6b).

Bei der Glocke „cis“ (Abb. 7a) bemerkt man eine Schwebung der *prime*, und bei der Glocke „dis“ (Abb. 8a) eine Schwebung bei *hum* und *prime*. Dies deutet auf geringe Abweichungen in der Symmetrie der Glocke hin.

Alle Aussagen über die Lautstärkenverteilungen beziehen sich auf eine einzige Mikrofonaufnahme und sind daher nicht unbedingt als repräsentativ anzusehen. Ein anderer Aufnahmestandort sowie andere Anschlagstellen an der Glocke hätten möglicherweise etwas abweichende Ergebnisse geliefert.



Abb. 9: Blick in eine Glocke, sichtbar die Aufhängung des Klöppels und leichte Abnutzungserscheinung am Schlagring der Glocke

Alle kleinen Abweichungen in der Stimmung sind normalerweise im Geläut mit den Ohren kaum wahrnehmbar, sondern nur mit elektronischen Methoden nachweisbar. Insgesamt stellen die Glocken ein gelungenes Werk dar.

Da es Resonanzanregungen zwischen der Bewegung der ais-Glocke und dem Wetterhahn auf dem Turm gegeben hat, bekam diese Glocke zur Verringerung der Läutefrequenz eiserne Zusatzmassen auf das Joch geschraubt und einen Klöppel mit größerer Masse (Abb. 11). Diese mechanische Veränderung hat aber keinen Einfluß auf die Frequenz und Verteilung der Teiltöne.

Clausthal, 12.1.2004

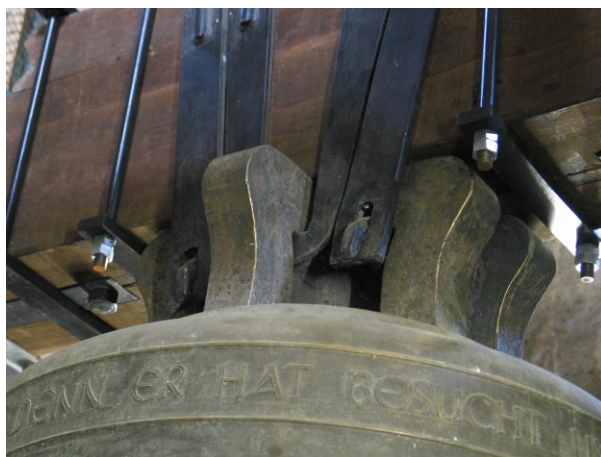


Abb. 10: Glockenkronen mit Aufhängung am Joch



Abb. 11: Die Glocke „ais“ mit Zusatzmassen auf dem Joch zur Verringerung der Läutefrequenz.